

提高二冲程煤油发动机抗爆性措施研究

丁昌露, 杨海青, 陈方超

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为解决某二冲程航空活塞发动机采用航空煤油后爆震极限功率严重下降的问题,进行了一维发动机性能仿真分析,提出了提高发动机爆震极限功率的技术措施。在发动机额定工况下,油耗率和排气温度不发生恶化的前提下,添加抗爆添加剂、降低压缩比和推迟点火提前角以抑制采用煤油后的发动机爆震倾向,扩大缸径和降低空燃比以助于恢复发动机的爆震极限功率。结果表明:经过优化,发动机输出功率可达到原型机的96%,油耗率增加了19%,排气温度升高了57 K。研究结果可为二冲程煤油发动机的性能优化和提高工作的可靠性提供依据。

关 键 词: 二冲程发动机; 低辛烷值燃料; 抗爆性; 一维性能仿真; 性能优化

中图分类号: V231; TK411.8

文献标志码: A

Study on anti-knock quality strategies of two-stroke kerosene engine

DING Changlu, YANG Haiqing, CHEN Fangchao

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An one-dimensional performance simulation was made to solve the problem that the knock limited power of a 2-stroke aviation engine decreases due to the use of aviation kerosene. Several technical measures were proposed to boost the knock limited power of engine. Under the rated condition that specific fuel consumption and exhaust temperature did not deteriorate, adding anti-knock additive, decreasing compression ratio and retarding ignition timing mitigated the knock tendency after using kerosene as the fuel instead of gasoline. Enlarging cylinder diameter and decreasing the Air-fuel ratio were beneficial to the recovery of knock limited power of engine. Result showed that, after optimization, the engine regained 96% of original output power. The specific fuel consumption increased by 19% and exhaust temperature increased by 57 K. The research results provide the basis for performance optimization and work reliability of two-stroke kerosene engine.

Key words: two-stroke engine; low-octane fuel; anti-knock quality; one-dimensional performance simulation; performance optimization

二冲程汽油机与四冲程相比有其不可比拟的
优势和特点:结构简单、升功率高、工作可靠、安装

体积小、成本低廉等,使其广泛应用于民用领域,
如汽车摩托车发动机、舷外机、小型无人机等。航

收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX15_0262)

作者简介: 丁昌露(1992—),男,硕士生,主要从事内燃机性能仿真与控制研究。

引用格式: 丁昌露,杨海青,陈方超. 提高二冲程煤油发动机抗爆性措施研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 2972-2980. DING Changlu, YANG Haiqing, CHEN Fangchao. Study on anti-knock quality strategies of two-stroke kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2972-2980.

空煤油(以下简称航煤)具有闪点高、使用安全性好等特点,作为特殊用途下的燃料具有很大的优势^[1-3]。将两者的特点结合起来的二冲程煤油发动机有很好的应用前景,对该类型发动机的研究具有重要意义。

但是,航煤与汽油相比,两者的燃烧特性有很大的不同,航煤蒸发性差,火焰传播速度较慢,辛烷值低导致抗爆性能较差,采用航煤作燃料的二冲程发动机将会产生明显的爆震现象^[4-5]。当发动机爆震强度较高时,其热效率会明显下降,工作不稳定,严重降低了发动机的最大功率输出^[6-8]。研究表明,发动机中混合气自燃部分高于总混合气的 5% 时,就能够引起强烈的爆震^[9]。因此,为提高二冲程煤油发动机的爆震极限功率,需要对其进行抗爆震措施的研究。

本文使用 GT-Power 软件建立起发动机的一维性能仿真模型,并通过实验对仿真模型进行修正,从而获得精确的数值计算模型,对发动机采用航煤后的的整机性能进行了数值模拟。针对爆震出现的原因,从缩短火焰传播持续时间和降低末端混合气的温度与压力的角度出发,通过调整发动机的结构参数和运行参数得到抑制爆震的措施。研究结果可为二冲程煤油发动机性能优化和提高工作可靠性的相关试验提供依据。

1 仿真原理及模型建立

1.1 性能仿真的目的和原理

发动机工作过程的研究方法主要有实验方法和数值模拟方法。实验方法是理论研究的前提和基础,但其研究周期长、成本高,提供的信息量有限。发动机工作过程数值模拟方法可以用来模拟发动机的稳态和瞬态过程,可以在发动机设计和调试测试阶段,通过对结构参数和性能参数的仿真计算,指出了各种影响参数的优化方向,从而不断优化发动机的性能。

本文所使用的 GT-Power 软件以一维流体力学和热力学为基础,应用有限容积法对管内一维非定常流动的基本方程式进行数值计算。流动模型同时包括连续方程、动量方程和能量方程,并设定所有的流体质量都是均匀流动的,主要的参变量是质量流量、密度和内能总和。对于发动机的燃烧和传热等过程,软件有多种燃烧模型和传热模型用于不同工况下的模拟,管道及节流口的工作过程都有对应的数值模型进行模拟^[10]。

1.2 原型机主要参数

本文研究的原型机是一台二冲程风冷式汽油机,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 原型机主要参数
Table 1 Main parameters of original engine

参数	数值及详情
机型	二冲程点燃式两缸直列式
喷油方式	进气道喷射
进气方式	簧片阀式
排量/cm ³	625
(缸径×行程)/(mm×mm)	76×69
名义压缩比	9.5 : 1
实际压缩比	6 : 1
排气道开启相位/(°)	84
扫气道开启相位/(°)	118
额定功率/kW	44.7(转速为 6000 r/min)
最大扭矩/(N·m)	73(转速为 6300 r/min)

1.3 仿真模型建立

为了便于建模,将发动机结构抽象为进气系统、缸体和排气系统 3 个部分,如图 1 所示。其中发动机的进气系统主要由空气滤清器、节气门、进气道和簧片阀组成;排气系统由排气歧管和总管组成。每个部分都包含诸多模块,每个模块代表发动机的一个部件。发动机工作时工质按图中箭头所示方向完成工作循环。

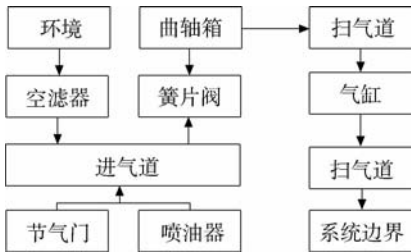


图 1 原型机简化工作图

Fig. 1 Simplified working diagram of original engine

GT-Power 软件通过采用模块结构的方式建立发动机工作过程计算模型。发动机的所有结构参数和运行参数在相应的元件模块和连接件模块中进行定义。根据热力学、传热学和流体力学的相关知识,对简化的物理模型进行定量的数学描述,将样机手册值和发动机台架的相关数据输入

对应模块,建立数学模型。如缸径、行程、压缩比和进排气系统的管长直径等数据由样机手册或实际测量得到,进排气阀及簧片阀的流量系数作为换气系统的重要参数在稳流试验台上得到,喷油器模型、扫气模型和燃烧模型来自发动机台架试验的实测值,此外还有一些参数采用 GT-Power 的推荐值或估算得到。

燃烧模型作为模拟缸内热力过程的关键,本文采用“EngCylCombSITurb”湍流燃烧模型,考虑了湍流速度、层流速度及燃烧室结构对火焰传播的影响,还可以预测点火时刻和点火能量对发

动机性能尤其是爆震的影响。

最终建立的模型如图 2 所示,模型中的主要参数存在的误差来源如下:

1) 使用直管来表示空滤器和消声器,修改表面粗糙度等参数来近似模拟这些部件,对这些部件的内部结构无法详细描述,再加上对管件和接头参数的人工测量存在误差,使得进排气系统的仿真存在缺陷。

2) 本文采用的是简化的传热模型。由于本模型中传热状态不需要重点关注,缸头、活塞表面和管壁面的一些热力学参数采用经验值。

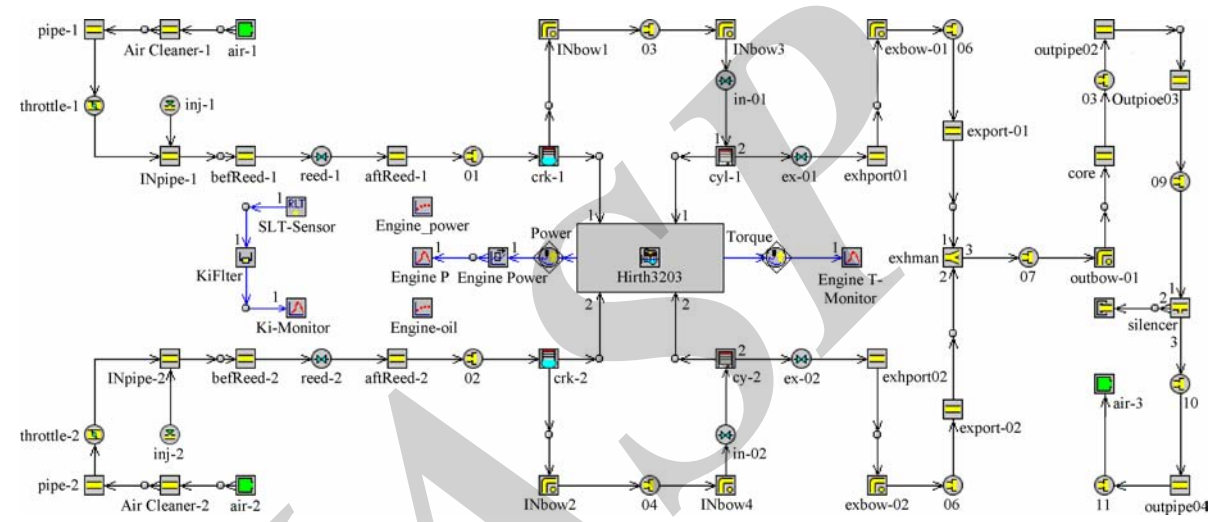


图 2 原型机 GT-power 模型
Fig.2 GT-power model of original engine

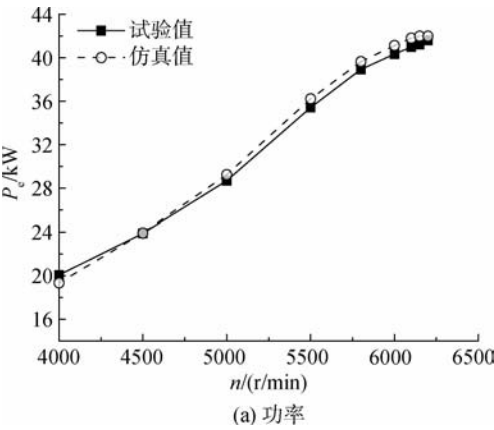
2 仿真模型的标定及改进

为使数值模拟的结果尽可能准确地反应发动机的机理,对发动机的性能进行正确分析和改进,将原型机模型的计算结果与台架试验的结果进行对比分析,要求最大误差为 8%。

在标定过程中,先采用韦伯燃烧模型对工况进行仿真,该非预测模型采用韦伯半经验公式,选择经验系数,将燃烧率设定为曲轴转角的函数,模拟发动机的燃烧规律,调整参数使模拟结果接近试验值^[11]。之后采用预测性的湍流燃烧模型,调整个别参数,最终得到能够真实反映原型机运行状况的模型^[12-13]。

将原型机仿真模型全负荷工况下的输出功率 P_e 、扭矩 T_e 和油耗率 $S_{f.e.b}$ 与前期的台架试验结果进行对比。由图 3 可知,输出功率和扭矩的仿真值与试验值在各转速下都吻合良好,而台架试验的油耗率相对于仿真值有一定误差,在转速 n 为

4000 r/min 时达到 6%,经过分析,这是由于台架试验中进气流量的测量采用稳态流量传感器,测量发动机动态进气过程误差较大,此外,模型计算中空气质量与燃料质量的比值(以下简称空燃比)统一简化为 14.7 和试验中存在的实际误差都导致两者的油耗率有一定误差。该模型可较为准确地模拟发动机的运行状况,可用于后续研究。



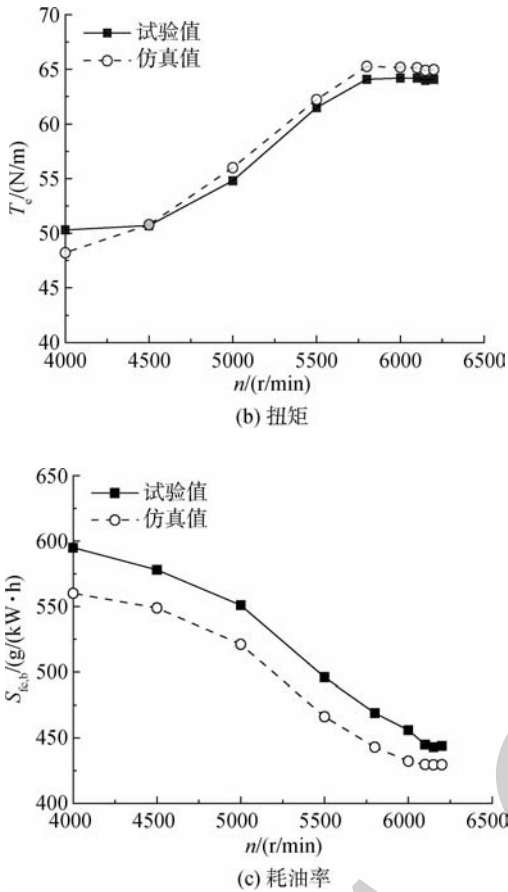


图 3 试验值与仿真值对比图

Fig. 3 Comparison between experimental and simulation results

3 发动机爆震预测与优化措施

3.1 爆震预测模型校核

将模型中的喷油燃料模块根据航煤的液态和蒸汽状态时的特性进行设置,一些其他参数,如燃料蒸发率、辛烷值和湍流火焰传播速度都需要根据航煤的特性进行设置。在燃烧模型“EngCyl-CombSITurb”中添加爆震预测模块“EngCyl-Knock”,模块中选择的预测模型基于 Douaud and Eyzat 公式,该公式考虑了燃料辛烷值、未燃气体瞬时温度和缸内瞬时压力对发动机爆震的影响^[14-15]。公式如下:

$$\tau = 5.72 \times 10^6 \cdot M_1 \cdot \left(\frac{V_{on}}{100} \right)^{3.402} \cdot p^{-1.7} \cdot \exp\left(\frac{3800}{M_2 \cdot T} \right) \quad (1)$$

$$t' = \int_{\alpha_{ivc}}^{\beta_{thkn}} \frac{1}{\tau} dt \quad (2)$$

式中 τ 为累积时间; M_1 为爆震感应时间因子; V_{on} 为辛烷值; p 为瞬时气缸压力; M_2 为活化能因子;

T 为瞬时未燃气体温度; α_{ivc} 为气缸内末端混合气压缩起始角; β_{thkn} 为爆震开始曲轴转角; t' 为累积时间积分。

在爆震预测模型中,模型的输出为爆震指数 K_i 、爆震起始曲轴转角和爆震强度,爆震强度是指爆震开始时气缸内未燃气体的质量分数。爆震指数定义如下:

$$K_i = 10000 \cdot M \cdot u \frac{V_{tdc}}{V} \exp\left(\frac{-T_a}{T_u} \right) \cdot c \quad (3)$$

$$c = \max[0, 1 - (1 - \varphi)^2] \cdot \tau \quad (4)$$

式中 K_i 为爆震指数; M 为爆震指数因子; u 为爆震开始时缸内缸内未燃混合气质量分数; V_{tdc} 为上止点时气缸体积; V 为气缸体积; T_a 为活化温度 (6000 K); T_u 为未燃气体瞬时温度; φ 为当量比。

爆震指数越大,发动机产生爆震的倾向越大。当 K_i 大于 50 时,可以认为发动机发生爆震,影响到发动机的正常工作。

根据台架试验数据,在采用航煤作燃料后,发动机在转速为 5800 r/min,油门开度为 42% 时发生爆震,缸头温度上升,功率和扭矩小幅度增长,在此工况点对爆震预测模型进行核定。

调整输入参数,使发动机模型刚好发生爆震,即算得的爆震指数恰好大于 50。爆震预测模块中的输入参数包括燃料辛烷值、爆震感应时间因子、活化能因子和爆震指数因子。根据之前 4 冲程煤油发动机的研究和相关文献[16-17],燃料辛烷值取 48,爆震指数因子 M 根据 GT-Power 手册推荐值取默认值 1。爆震感应时间因子 M_1 和活化能因子 M_2 需要进行参数校核,两个参数的默认值都为 1, M_1 比 1 越小则爆震越严重,比 1 越大则爆震越轻微, M_2 对爆震的影响则相反,且 M_2 的变化对爆震影响较大,将 M_2 作为主要调节参数, M_1 作为微调参数。根据以上原则和先前估算框定的大致范围,试算了 5 种不同的 M_1 值 (分布范围为 1.15~1.35) 以及 5 种不同 M_2 值 (分布范围为 0.6~0.8) 所组成的 25 种不同的参数取值方案。

图 4 所示为 25 个方案点的爆震指数计算值。由图可见随着 M_2 的减小爆震指数呈下降趋势,在 M_2 取 0.7 的时候,5 个取值点穿过爆震起始线,当 $M_1=1.25$ 时,爆震指数 $K_i=90$,即产生爆震。最终确定爆震感应时间因子为 1.25,活化能因子为 0.7。表 2 为发动机爆震极限点的核定结果。

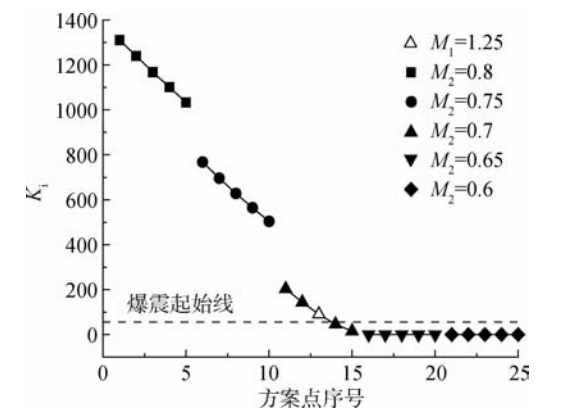


图 4 参数 M_1 和 M_2 对爆震的影响

Fig. 4 Effect of parameter M_1 and M_2 on knock

表 2 发动机爆震极限点核定结果

Table 2 Calibration results of engine knock limit point

参数	数值及说明	
	试验值	仿真值
转速/(r/min)	5 800	5 800
油门开度/%	42	42
扭矩/(N·m)	43.9	42.9
功率/kW	26.66	26
爆震指数 K_i	爆震	90
油耗率/(g/(kW·h))	462	456

综上,该模型已经可以较为真实地反应发动机的爆震特性,可以以此为基础进行爆震预测和优化。

3.2 爆震预测及优化措施

采用航煤作燃料后,发动机产生严重爆震,限制了额定工况(转速为 6 000 r/min,油门开度为 100%)的输出性能。通过添加抗爆添加剂,调整点火提前角、压缩比、空燃比和缸径等措施,分析这些参数对发动机性能及爆震特性的影响,确定最优参数使发动机在额定工况下输出性能达到最佳且不发生严重爆震,同时保证排气温度,油耗率等指标不出现明显恶化。

3.2.1 点火提前角与压缩比对爆震及性能的影响

点火提前角对爆震的影响如图 5 所示,(图中以空心点表示爆震工况,下文各图采用相同表达方式)。在未发生爆震时,随着点火提前角提前,发动机的功率和爆震指数升高,油耗率和排气温度下降。随着点火提前角继续提前,最高燃烧压力增加,末端混合气受到的挤压作用大,导致发动机爆震倾向增加。在原有其他参数不变的前提

下,点火提前角 A_c 推迟到 -16° 时,爆震现象消失。此时各参数与原型机的对比如表 3 所示。

压缩比提高会增加气缸内的温度和压力,使末端混合气的温度和压力提高,增加爆震倾向,因此新的压缩比应低于原有压缩比(9.5),本文选取了 9.5~7.5 的 5 个压缩比。如图 5 所示,随着压缩比减小,功率下降,出现爆震的工况点逐渐减

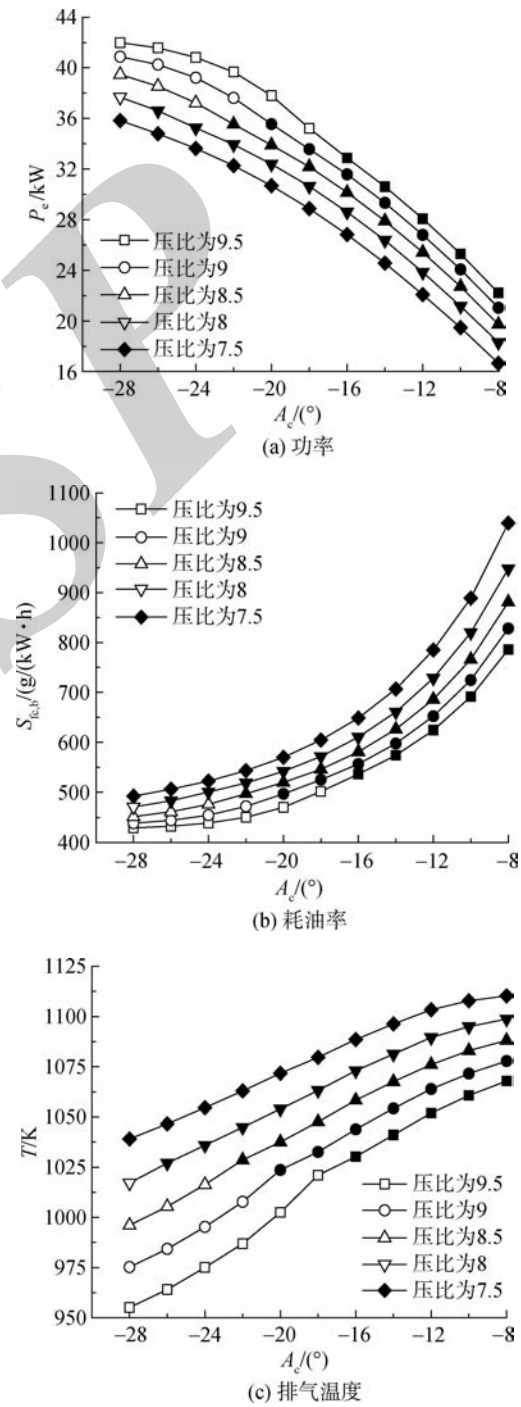


图 5 点火提前角及压缩比对发动机性能影响

Fig. 5 Effect of ignition timing angle and compression ratio on engine performance

表 3 3 个爆震极限工况点的参数对比
Table 3 Comparison of parameters at 3 knock limit points

参数	原型机	极限点 1	极限点 2	极限点 3
点火提前角/(°)	-26	-16	-26	-20
压缩比	9.5	9.5	8	9.5
燃料辛烷值	48	48	48	61
功率/kW	41.7	32.9	36.6	37.6
油耗率/(g/(kW·h))	431	537	483	472
排气温度/K	960	1030	1027	1003

少,油耗率和排气温度 T 上升。虽然压缩比为 8 压缩终了缸内压力低,使得燃烧速度慢,导致油耗率和排气温度较高,但其在点火提前角保持原有一 26° 不变时爆震消失,且相对于其余压缩比极限功率最高,此时各参数与原型机对比如表 3 所示。

3.2.2 抗爆添加剂对爆震及性能的影响

根据之前对煤油发动机的研究和相关文献 [14],加抗爆添加剂后,航煤的辛烷值由 48 增加到 61。在保持发动机其他参数不变的前提下,抗爆添加剂对爆震及性能的影响如图 6 所示,相对于 FON(fuel octane number)48,FON61 的爆震指数大幅下降,功率略有下降,排气温度和油耗率略有上升,最大点火提前角由 -16° 提前到 -20° ,未发生爆震时的最大功率为 37.6 kW ,在 FON48 的基础上提升了 3.8 kW ,故抗爆添加剂有利于爆震极限功率的恢复。添加抗爆添加剂前后爆震极限工况点各参数对比如表 3 所示。

3.2.3 抑制爆震的综合措施

以上计算得到的 3 个爆震极限工况点各参数与原型机的对比如表 3 所示。相对于其他极限

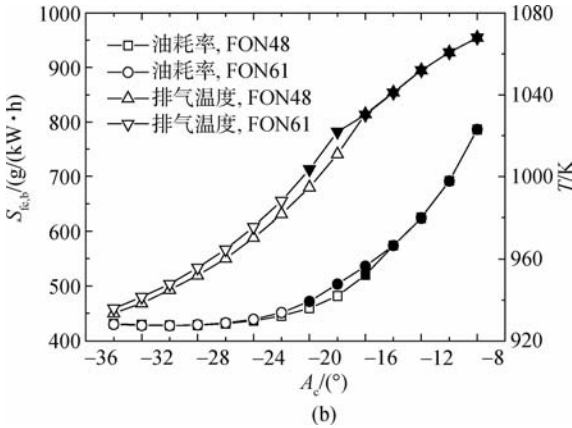


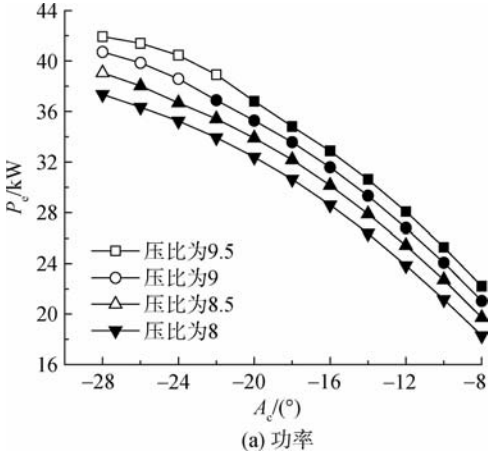
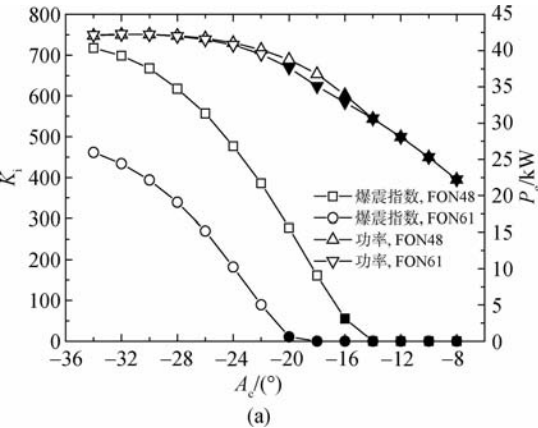
图 6 抗爆添加剂对发动机性能影响
Fig.6 Effect of anti-knock additive on engine performance

点,极限点 3 的爆震极限功率较高,且油耗率和排气温度较低。因此在接下来的提高爆震极限功率的综合措施中,首先添加抗爆剂,再调节其他参数,可以更有效地恢复爆震极限功率。

在航煤中添加抗爆添加剂后,压缩比改变对爆震及性能的影响如图 7 所示。在保持原有点火提前角不变和不发生爆震的前提下,压缩比可以在添加抗爆添加剂的基础上只降低到 8.5,爆震极限功率达到 38 kW ,油耗率为 467 g/(kW·h) ,排气温度为 1008 K 。以此为固定条件,为进一步提升恢复功率,对变化缸径和空燃比进行研究。

缸径增大使缸内火焰传播距离增大,延长火焰前锋面传播到末端混合气的时间,使爆震倾向增大。如图 8 所示,缸径为 79 mm 在 -26° 点火提前角处的爆震极限功率相对于缸径为 76 mm 提升 1 kW ,油耗率下降了 10 g/(kW·h) ,排气温度升高了 35 K 。选取缸径为 79 mm 为后续研究条件。

当过量空气系数 $\alpha=0.8\sim 0.9$ 时,由于燃烧温度最高,火焰传播速度最快,功率达到最大值,但爆震倾向增大 [18]。如图 9 所示,空燃比为 12.7



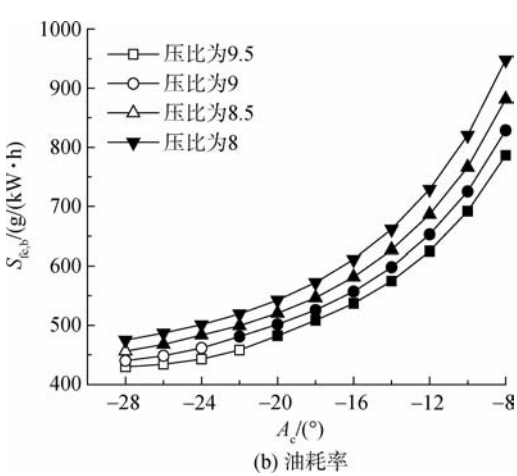


图 7 加抗爆添加剂后,压缩比对发动机性能影响
Fig. 7 Effect of compression ratio on engine performance after adding anti-knock additive

的爆震极限工况点推迟到 -24° ,极限功率比空燃比为 14.7 时提升了 0.9 kW,油耗率上升了 18 g/(kW·h),排气温度下降了 30 K。因此空燃比定为 12.7 更有利于功率恢复。

3.3 最终改良方案

通过添加抗爆添加剂和降低压缩比,显著地

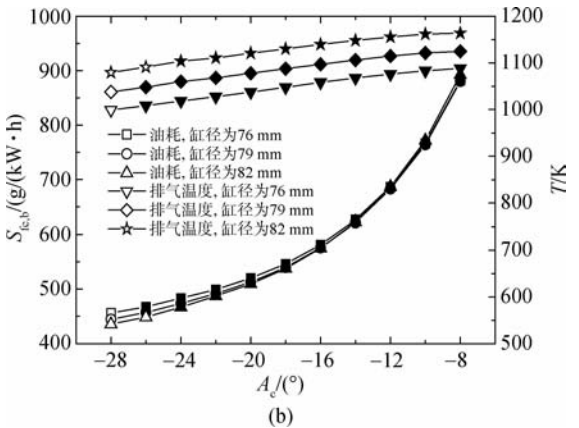
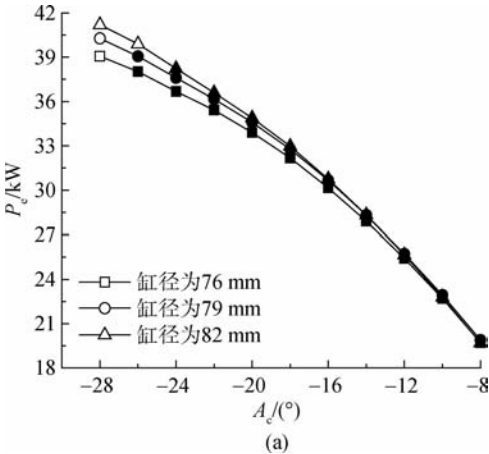


图 8 不同缸径对发动机性能影响
Fig. 8 Effect of different cylinder diameters on engine performance

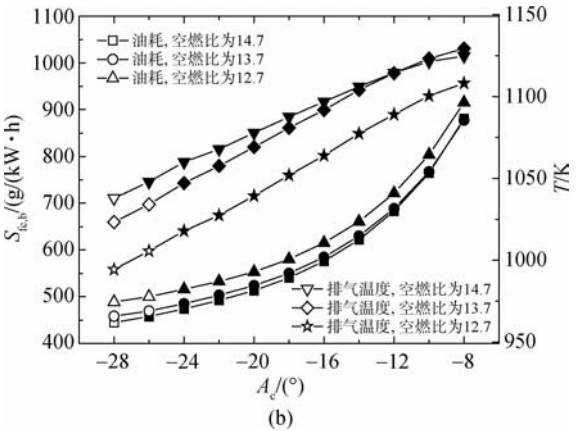
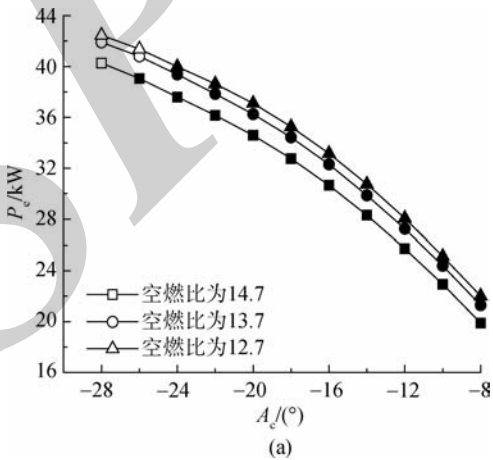


图 9 不同空燃比对发动机性能影响
Fig. 9 Effect of different air-fuel ratios on engine performance

减小了缸内爆震倾向,有助于爆震极限功率的恢复。在保证后燃损失和排气温度不明显增加的前提下,可以通过适当减小点火提前角降低爆震倾向。降低的爆震极限功率可以通过适当的扩大缸

径和减小空燃比来恢复,各参数变化都以油耗率和排气温度不发生恶化为前提。改良前后的参数和性能对比如表 4。

表 4 发动机主要参数改良前后对比
Table 4 Comparison of main parameters between original and improved engine

参数	原型机	改良机
点火提前角/(°)	—26	—24
压缩比	9.5	8.5
缸径/mm	76	79
空燃比	14.7	12.7
功率/kW	41.7	39.98
油耗率/(g/(kW·h))	431	515
排气温度/K	960	1017

4 结 论

通过上述仿真分析及对比可以得出如下结论:

- 1) 采用添加抗爆添加剂、降低压缩比、减小点火提前角、扩大缸径和降低空燃比的方案,使发动机在不发生爆震的前提下,有较好的输出性能。
- 2) 经过优化,发动机的功率可达到原型机的 96%,油耗率和排气温度有小幅上升。
- 3) 仿真结果表明,低辛烷值的航空煤油可以用于某型号二冲程发动机的汽油替代燃料,拓宽了该型机的燃料使用范围。

参考文献:

[1] 陈林林. 二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
CHEN Linlin. Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009. (in Chinese)

[2] 钱丁超. 二冲程重油发动机燃烧系统的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
QIAN Dingchao. Simulation and experiment research on combustion system of two-stroke heavy fuel engine[D]. Changchun:Jilin University,2015. (in Chinese)

[3] 李冰林. 活塞式煤油发动机点火提前角仿真计算与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
LI Binglin. Simulation and experimental study on spark advance of piston kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

[4] 梁金虎,王苏,张灿. RP-3 航空煤油点火特性研究[J]. 力学学报,2014,46(3):352-359.
LIANG Jinhu, WANG Su, ZHANG Can. Studies on the auto ignition characteristics of RP-3 aviation kerosene[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014,46(3):352-359. (in Chinese)

[5] BRADLEY D, KALGHATGI G T. Influence of auto ignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engine[J]. Combustion and Flame,2009,156(12):2307-2318.

[6] 吴平友,黄河,程庆. 汽油发动机爆震分析与控制[J]. 传动技术,2003,9(3):36-38.
WU Pingyou, HUANG He, CHENG Qing. The engine knock analysis and control[J]. Drive System Technique, 2003,9(3):36-38. (in Chinese)

[7] BRUNT M F, POND C R, BIUNDO J. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data[J]. Society of automotive engineers,1998,107(3):1399-1412.

[8] GRANDIN B. Knock in gasoline engines; the effects of mixture composition on knock onset and heat transfer[D]. Goteborg:Chalmers University of Technology,2001.

[9] 姚春德,姚安仁,续晗. 内燃机爆震及其对燃烧室组件破坏的机理[M]. 北京:科学出版社,2015.

[10] 杨琦,杨海青. 二冲程汽油机外特性改良方法仿真[J]. 重庆理工大学学报,2013,27(2):49-56.
YANG Qi, YANG Haiqing. Two-stroke gasoline engine simulation study of the methods to the performance optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology,2013,27(2):49-56. (in Chinese)

[11] 周松,王银燕,明平剑. 内燃机工作过程仿真技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

[12] 李岳林. 汽油机多区燃烧模型的建立及应用研究[D]. 西安:长安大学,2002.
LI Yuelin. The multi-area model and application for combustion process in gasoline engines[D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese)

[13] 李岳林,张志沛,张雨. 汽油机燃烧过程模拟分析[J]. 内燃机学报,2000,18(1):57-62.
LI Yuelin, ZHANG Zhipei, ZHANG Yu. Simulation analysis of the combustion process in gasoline engine[J]. Transactions of Crank Shaft Internal Combustion Engine (CSICE),2000,18(1):57-62. (in Chinese)

[14] 傅茂林,李建权,王良煜. 火花点火发动机爆震燃烧的实验研究[J]. 内燃机学报,1996,14(4):410-416
FU Maolin, LI Jianquan, WANG Liangyu. An experimental investigation of knock in a spark ignition engine[J]. Transactions of Crank Shaft Internal Combustion Engine (CSICE),1996,14(4):410-416. (in Chinese)

[15] 傅茂林,李建权,王良煜. 火花点火发动机的末端气体自然及爆震的研究[J]. 工程热物理学报,1997,18(2):246-250.
FU Maolin, LI Jianquan, WANG Liangyu. A study on end gas autoignition and knock in the spark ignition engines

[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(2): 246-250. (in Chinese)

[16] 盛敬. 二冲程煤油发动机爆震燃烧数值模拟与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.

SHENG Jing. Simulation and experimental study on knock combustion in two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

[17] 盛敬, 魏民祥, 刘国满. 基于内禀模态高频积分能量法的煤油发动机爆震因子计算方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 504-510.

SHENG Jing, WEI Minxiang, LIU Guoman. Calculating method of knock factors based on method of intrinsic mode function high-frequency integral energy for kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 504-510. (in Chinese)

[18] 颜伏伍, 候献军. 汽车发动机原理[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.

(编辑: 王碧琚)